

М. А. ШУЛЬГА, Д. В. КОТОВ, А. В. БОГОМАЗ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В МАКСИМУМЕ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ НА СЛАБУЮ ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ 24 ДЕКАБРЯ 2017 г. В РАЗНЫХ ШИРОТАХ ЕВРОПЕЙСКОГО РЕГИОНА

Представлены результаты исследования вариаций концентрации электронов в максимуме слоя F2 по данным ионозондов, расположенных в разных геомагнитных широтах Европейского региона. Проведен анализ влияния слабой геомагнитной бури 24 декабря 2017 г. на вариации концентрации электронов $NmF2$. Показано, что для внешних магнитных силовых трубок в магнитоспокойный период (22 – 24 декабря 2017 г.) значения концентрации электронов $NmF2$ увеличивались в ночные часы в 1.5 раза. В результате слабой геомагнитной бури (минимальное значение $Dst \approx -22$ nT, максимальное значение $K_p=3+$) 24 декабря 2017 г. наблюдалось уменьшение значений $NmF2$ в 1.5 – 2 раза в ночные часы 25 – 26 декабря 2017 г. Выявлено, что внутренние области магнитосферы ($L \approx 1.56, 1.456$) не сильно подвержены влиянию слабых геомагнитных бурь. Рассмотрены физические механизмы, влияющие на увеличение (нисходящий поток ионов H^+ из плазмосферы в ионосферу) и уменьшение значений $NmF2$ (частичное опустошение магнитной силовой трубки в утренние часы 25 декабря 2017 г. и ослабленный нисходящий поток ионов H^+ в ночные часы 25 – 26 декабря 2017 г.).

Ключевые слова: геомагнитная буря, ионосфера, критическая частота, концентрация электронов, ионозонд, магнитная силовая трубка.

М. О. ШУЛЬГА, Д. В. КОТОВ, О. В. БОГОМАЗ

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ В МАКСИМУМІ ШАРУ F2 ІОНОСФЕРИ НА СЛАБКУ ГЕОМАГНІТНУ БУРЮ 24 ГРУДНЯ 2017 р. В РІЗНИХ ШИРОТАХ ЄВРОПЕЙСЬКОГО РЕГІОНУ

Представлені результати дослідження варіацій концентрації електронів в максимумі шару F2 за даними іонозондів розташованих у різних геомагнітних широтах Європейського регіону. Проведено аналіз впливу слабкої геомагнітної бури 24 грудня 2017 р. на варіації концентрації електронів $NmF2$. Показано, що для зовнішніх магнітних силових трубок в магнітоспокійний період (22 – 24 грудня 2017 р.) значення концентрації електронів $NmF2$ збільшувались у нічні години в 1.5 рази. В результаті слабкої геомагнітної бури (мінімальні значення $Dst \approx -22$ nT, максимальні значення $K_p=3+$) 24 грудня 2017 р. спостерігалось зменшення значень $NmF2$ в 1.5 – 2 рази в нічні години 25 – 26 грудня 2017 р. Виявлено, що внутрішні області магнітосфери ($L \approx 1.56, 1.456$) не сильно піддаються впливу слабких геомагнітних бурь. Розглянуто фізичні механізми що впливають на збільшення (низхідний потік іонів H^+ із плазмосфери в іоносферу в нічні години) та зменшення значень $NmF2$ (часткове спустошення магнітної силової трубки в ранкові години 25 грудня 2017 р. та ослаблений низхідний потік іонів H^+ у нічні години 25 – 26 грудня 2017 р.).

Ключові слова: геомагнітна буря, іоносфера, критична частота, концентрація електронів, іонозонд, магнітна силова трубка.

M. O. SHULHA, D. V. KOTOV, O. V. BOGOMAZ

INVESTIGATION OF THE IONOSPHERIC F2-LAYER ELECTRON DENSITY PEAK REACTION TO WEAK GEOMAGNETIC STORM OF DECEMBER 24, 2017 FOR DIFFERENT LATITUDES OF THE EUROPEAN REGION

The results of investigation of variations of the ionospheric F2-layer electron density peak according to ionosonde data located in different geomagnetic latitudes of the European region are presented. The analysis of the effect of weak geomagnetic storm on December 24, 2017 on the electron density variations $NmF2$ was carried out. It is shown that for external magnetic flux tubes during magnetically quiet period (December 22 – 24, 2017) the nighttime values of electron density $NmF2$ were increased by a factor of 1.5. As a result of a weak geomagnetic disturbance (minimum of $Dst \approx -22$ nT, maximum of $K_p=3+$) of December 24, 2017 a factor of 1.5 – 2 decrease in $NmF2$ values during nighttime of December 25 – 26, 2017 was observed. It was revealed that the deeper magnetosphere ($L \approx 1.56, 1.456$) is not strongly exposed by the weak geomagnetic storms. The physical mechanisms influencing the increase (downward plasmaspheric H^+ flux during nighttime) and decrease in $NmF2$ values (partial depletion of magnetic flux tube in the morning hours of December 25, 2017 and weaker downward H^+ flux during the night of December 25 – 26, 2017) are considered.

Keywords: geomagnetic storm, ionosphere, critical frequency, electron density, ionosonde, magnetic flux tube.

Введение. Электронная концентрация является основным параметром ионосферы. В частности, информация об электронной концентрации в максимуме слоя F2 ($NmF2$) важна для бесперебойной работы высокочастотной радиосвязи, функционирования радиолокационных систем, спутниковой навигации, моделирования ионосферы, а также для описания поведения ионосферы при различных условиях космической погоды.

В настоящее время исследованиям и анализу вариаций $NmF2$ посвящено много работ [см., например, 1 – 5], которые описывают долготные,

сезонные, годовые, суточные зависимости $NmF2$ от уровня солнечной и геомагнитной активности для разных регионов земного шара. Стоит отметить, что особое внимание уделяется исследованию влияния сильных геомагнитных бурь на ионосферу. Однако, изучение и анализ поведения параметров ионосферной плазмы при слабых геомагнитных возмущениях не менее актуально, поскольку существенные изменения ионосферы происходят даже при очень слабом росте геомагнитной активности.

В наших предыдущих исследованиях в спокойных условиях были выявлены эффекты

© М. А. Шутьга, Д. В. Котов, А. В. Богомаз, 2018

Таблица 1. Список ионозондов, используемых в данном исследовании

Название станции	Географические координаты	Геомагнитная широта	Параметр Мак-Иллвейна (на высоте 300 км)
Moscow	55.47°N, 37.3°E	51.08°N	2.722
Juliusruh	54.6°N, 13.4°E	53.93°N	2.671
Chilton	51.5°N, 359.4°E	53.27°N	2.376
Dourbes	50.1°N, 4.6°E	51.05°N	2.211
Pruhonice	50°N, 14.6°E	49.29°N	2.178
Kharkiv	49.6°N, 36.3°E	45.51°N	2.129
San Vito	40.6°N, 17.8°E	39.63°N	1.56
Athens	38°N, 23.5°E	36.16°N	1.456

увеличения $NmF2$ в период зимних ночей за счёт сильного нисходящего потока ионов H^+ из плазмосферы в ионосферу и уменьшения $NmF2$ за счёт опустошения магнитной силовой трубки над г. Харьковом слабыми магнитными бурями (при этом нисходящий ночной поток уменьшается) [6]. Такой эффект, например, был зарегистрирован над нами для периода близкого к зимнему солнцестоянию 22 – 26 декабря 2017 г. [7].

Целью данной работы является исследование и анализ временных вариаций $NmF2$ для этого периода и выявление эффекта слабой геомагнитной бури 24 декабря 2017 г. ($Kp=3+$, минимальное значение $Dst \approx -22$ nT) в разных широтах Европейского региона.

Средства и методы. В настоящей работе использованы данные о критической частоте слоя F2 ионосферы f_oF2 , полученные с помощью ионозонда расположенного в обсерватории Института ионосферы и базы цифровых ионограмм Digital Ionogram Database для 7 станций вертикального зондирования ионосферы расположенных в разных геомагнитных широтах Европейского региона [8].

Расположение этих станций представлено на рис. 1. Более подробные сведения о них приведены в табл. 1.

Для расчёта значений концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы использовано следующее соотношение [4, 5]:

$$NmF2 = f_oF2^2 \cdot 1.24 \cdot 10^{10} \quad (1)$$

где $NmF2$ – электронная концентрация в максимуме слоя F2 (m^{-3});

f_oF2 – критическая частота слоя F2 ионосферы (MHz).

Результаты наблюдений и обсуждение. На рис. 2 и 3 представлены суточные и широтные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы для периода, близкого к зимнему солнцестоянию 22 – 26 декабря 2017 г. С полуночи 22 декабря 2017 г. до полудня 24 декабря 2017 г. была спокойная геомагнитная обстановка. Значения планетарного индекса Kp варьировались от 0 до 1+. При этом, по-видимому, происходило увеличение концентрации нейтрального водорода, и, как результат, усиливался поток ионов водорода H^+ из ионосферы в плазмосферу в течение дневных часов. Это в свою очередь привело к сильному нисходящему потоку ионов H^+ из магнитной силовой трубки в ночные часы. Эти ионы H^+ , передавая свой заряд нейтральным атомам кислорода O, тем самым увеличивают концентрацию атомарного кислорода O^+ . В свою очередь ионы кислорода O^+ на высотах слоя F2 и выше являются доминирующей составляющей и $N_e \approx N(O^+)$ [9]. Отсюда рост концентрации ионов O^+ приводит к увеличению концентрации электронов в области максимума слоя F2. Вероятнее всего, именно поэтому мы видим увеличение $NmF2$ от ночи к ночи в магнитоспокойный период. Как видно из рис. 2 и 3 для станций Juliusruh, Chilton, Dourbes и Prochoice (L-оболочки 2.671, 2.376, 2.311 и 2.138 соответственно) в ночные часы 22 – 23 и 23 – 24 декабря $NmF2 \approx 1.4 \cdot 10^{11} m^{-3}$, тогда как в период 24 – 25 декабря ночные значения $NmF2$ составляли уже порядка $2.1 \cdot 10^{11} m^{-3}$. Таким образом, $NmF2$ увеличилась почти в 1.5 раза.

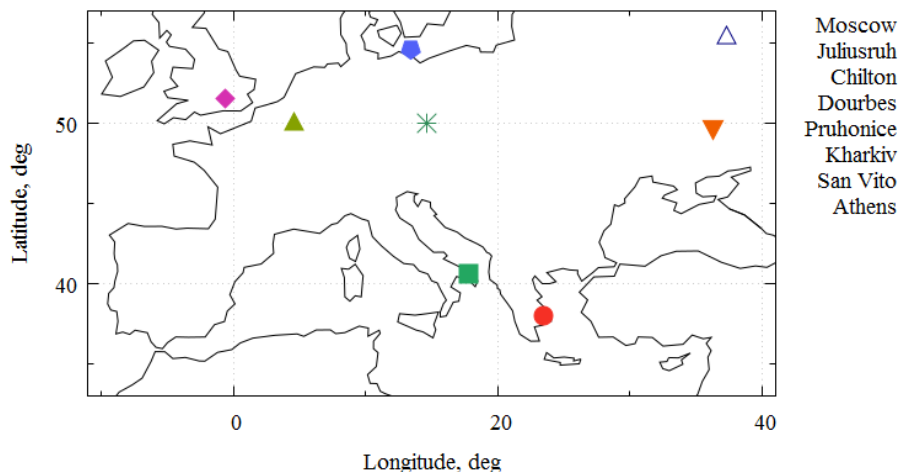


Рис. 1. Расположение станций вертикального зондирования в Европейском регионе

Для более низкоширотных станций San Vito и Athens с L-оболочками 1.56 и 1.456 соответственно, такой эффект увеличения электронной концентрации в ночные часы был выражен слабее (см. рис. 3). $NmF2$ была порядка $0.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ для 22 – 23 декабря и незначительно выросла 23 – 24 декабря и 24 – 25 декабря до $1.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (увеличение $NmF2$ примерно в 1.5 раза).

После полудня 24 декабря 2017 г. наблюдался небольшой рост Кр до значения 3+. Из вариаций концентрации электронов видно, что даже этого небольшого роста оказалось достаточно для изменения поведения $NmF2$ в ночное время суток 25 – 26 декабря 2017 г.

На рис. 3, б видно, что $NmF2$, полученная для Харькова, уменьшилась в 2 раза по сравнению со значениями концентрации для предыдущей ночи. Подобное поведение электронной концентрации в этот период прослеживается и на станциях в Pruhonice, Juliusruh. Для Moscow, Chilton и Dourbes $NmF2$ уменьшилась почти в 1.5 раза.

В более низкоширотных областях по данным станций, расположенных в San Vito и Athens, подобного эффекта уменьшения электронной концентрации не наблюдалось. Как в ночь 24 – 25 декабря, так и в ночь 25 – 26 декабря $NmF2$ была практически неизменна и составляла порядка $1.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

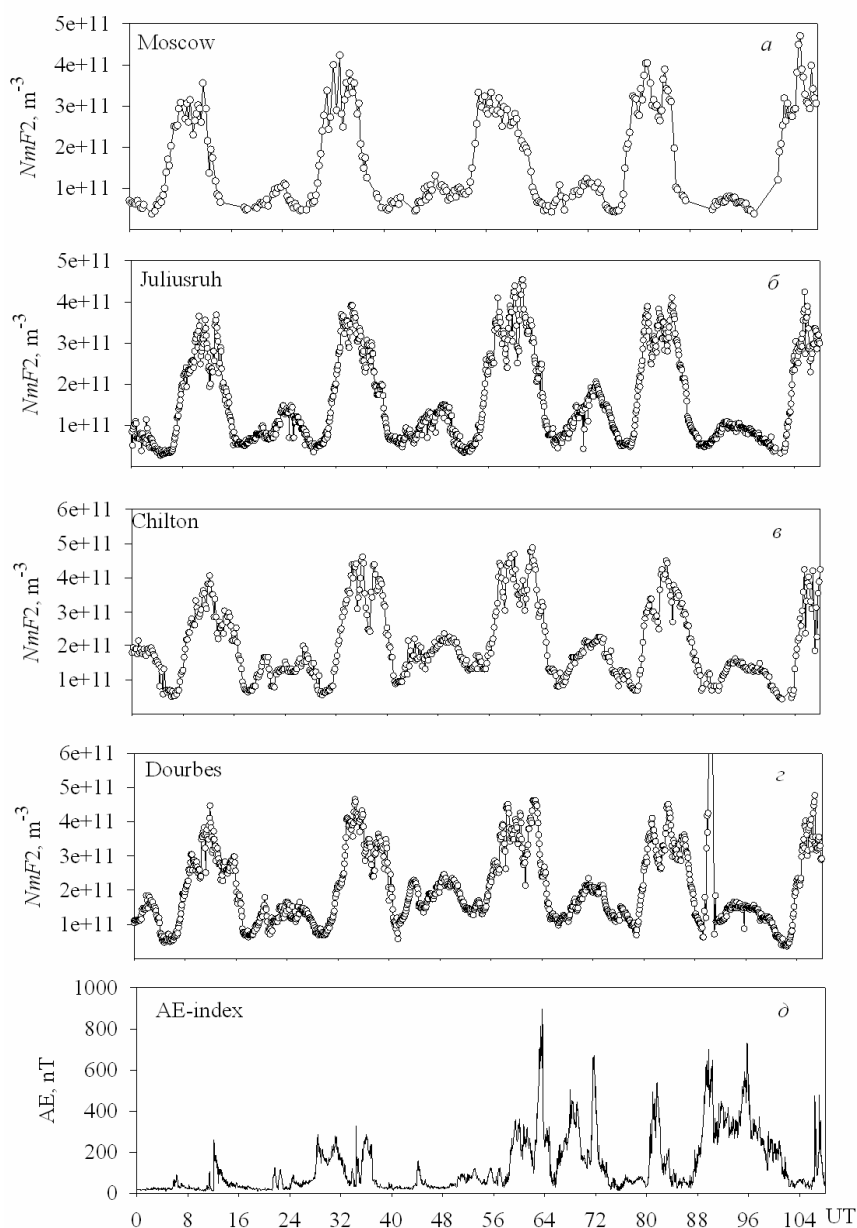


Рис. 2. Суточные и широтные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы 22 – 26 декабря 2017 г.

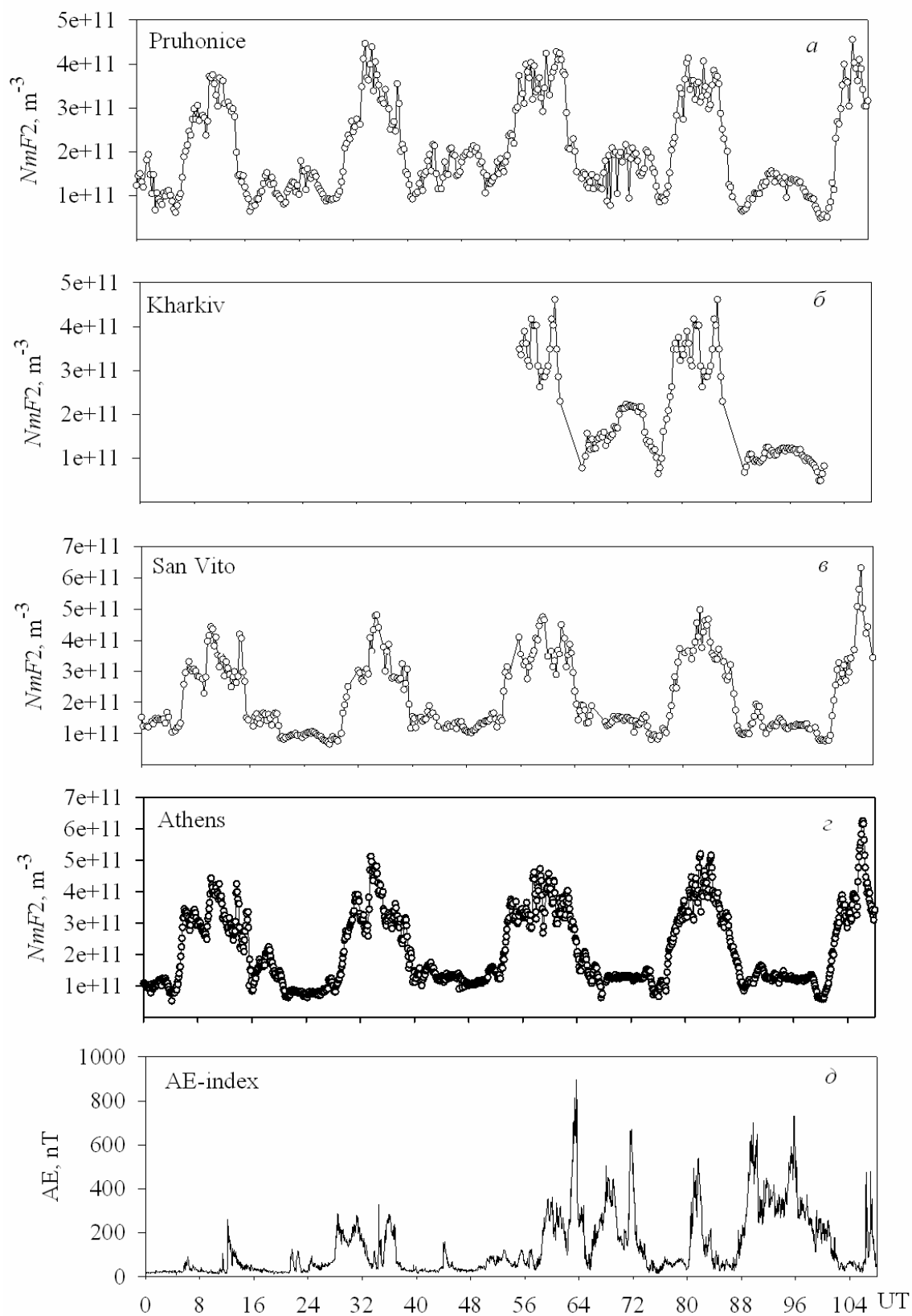


Рис. 3. Суточные и широтные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы 22 – 26 декабря 2017 г.

В работе [7] уже говорилось о том, что слабый поток из плазмосферы обусловлен выносом плазмы из магнитных силовых трубок конвекцией, вызванной проникающими магнитосферными электрическими полями в интервале времени 02:00 – 05:00 UT для 25 декабря 2017 г. Вследствие этого, в вечерние и ночные часы 25 – 26 декабря 2017 г. мы наблюдаем уменьшение значений электронной концентрации. Вероятно, это могло быть связано с тем, что магнитная силовая трубка не успела полностью заполниться с момента утреннего опустошения до вечера 25 декабря и поток ионов H^+ , который в предыдущую ночь приводил к росту $NmF2$, был ослаблен.

Что касается низких широт, то здесь стоит отметить, что более глубокая магнитосфера ($L \approx 1.56, 1.456$) не сильно подвержена влиянию слабых геомагнитных бурь. Магнитосферные электрические поля, приводящие к опустошению трубок за счёт конвекции, не проникают на такие низкие L -оболочки даже во время сильных возмущений.

Выводы.

1. Выполнен анализ суточных и широтных вариаций концентрации электронов в максимуме слоя F2 в период зимнего солнцестояния.

2. Выявлено, что для внешних магнитных силовых трубок с параметрами $L=2.129-2.671$ значения концентрации электронов в магнитоспокойный период увеличивались в ночные часы в период с 22 декабря по 24 декабря 2017 г. примерно в 1.5 раз. Предположительно основной причиной такой реакции $NmF2$ является усиление нисходящих потоков ионов H^+ из плазмосферы в ионосферу в ночные часы.

3. В результате слабой геомагнитной бури 24 декабря 2017 г. ночные значения $NmF2$, которые были получены на станциях Moscow, Juliusruh, Chilton, Dourbes, Pruhonice, Kharkiv 25 – 26 декабря 2017 г. уменьшились в 1.5 – 2 раза по сравнению со значениями концентрации для предыдущих ночей. Такой спад электронной концентрации мог быть вызван частичным опустошением магнитной силовой трубки в послебуревой период в интервале времени 02:00 – 05:00 UT 25 декабря 2017 г. и ослабленным нисходящим потоком ионов H^+ в ночные часы 25 – 26 декабря 2017 г. На более низких широтах реакция $NmF2$ на слабую геомагнитную бурю была выражена слабее и особо не повлияла на вариации электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы.

Список литературы

- Richards P. G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models // *Geophysical Research*. 2001. V. 106, № A7. P. 12,803–12,819.
- Gerzen T., Jakowski N., Wilken V., Hoque M. M. Reconstruction of F2 layer peak electron density based on operational vertical total electron content maps // *Annales Geophysicae*. 2013. V. 31, № 7, P. 1241–1249. doi: 10.5194/angeo-31-1241-2013.
- Hoque M. M., Jakowski N. A new global empirical $NmF2$ model for operational use in radio systems // *Radio Science*. 2011. V. 46, № 6. P. 1–13. doi:10.1029/2011RS004807.

- Ma R., Xu J., Wang W., Yuan W. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric $NmF2$ and solar activity indices // *Geophysical Research*. 2009. V. 114. doi:10.1029/2009JA014353.
- Perna L., Pezzopane M., Ezquer R., Cabrera M., Baskaradas J.A. $NmF2$ trends at low and mid latitudes for the recent solar minima and comparison with IRI-2012 model // *Advances in Space Research*. 2017. V.60. P. 363–374. doi:10.1016/j.asr.2016.09.025.
- Kotov D. V., Richards P. G., Bogomaz O. V., Chernogor L. F., Truhlik V., Emelyanov L. Y., Chepurnyy Y. M., Domnin I. F. The importance of neutral hydrogen for the maintenance of the midlatitude winter nighttime ionosphere: Evidence from IS observations at Kharkiv, Ukraine, and field line interhemispheric plasma model simulations // *Journal Geophysical Research: Space Physics*. 2016. V. 121. P. 7013 – 7025. doi:10.1002/2016JA022442.
- Kotov D. V., Richards P. G., Truhlik V., Bogomaz O. V., Shulha M. O., Maruyama N., Hairston M., Miyoshi Y., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Matsuoka A., Shinohara I., Hernández-Pajares M., Domnin I. F., Zhivolup T. G., Emelyanov L. Ya., Chepurnyy Ya. M. Coincident Observations by the Kharkiv IS Radar and Ionosonde, DMSP and Arase (ERG) Satellites, and FLIP Model Simulations: Implications for the NRLMSISE-00 Hydrogen Density, Plasmasphere, and Ionosphere // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. P. 8062 – 8071. doi: 10.1029/2018GL079206.
- Digital Ionogram DataBase. URL: <http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php> (дата обращения: 25.10.2018).
- Schunk R., Nagy. A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. New York: University Press, 2009. 628 p.

References (transliterated)

- Richards P. G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models // *Geophysical Research*, 2001, vol. 106, № A7, pp. 12,803–12,819.
- Gerzen T., Jakowski N., Wilken V., Hoque M. M. Reconstruction of F2 layer peak electron density based on operational vertical total electron content maps // *Annales Geophysicae*, 2013, vol. 31, № 7, pp. 1241–1249. doi: 10.5194/angeo-31-1241-2013.
- Hoque M. M., Jakowski N. A new global empirical $NmF2$ model for operational use in radio systems // *Radio Science*, 2011, vol. 46, № 6, pp. 1–13. doi:10.1029/2011RS004807.
- Ma R., Xu J., Wang W., Yuan W. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric $NmF2$ and solar activity indices // *Geophysical Research*, 2009, vol. 114. doi:10.1029/2009JA014353.
- Perna L., Pezzopane M., Ezquer R., Cabrera M., Baskaradas J.A. $NmF2$ trends at low and mid latitudes for the recent solar minima and comparison with IRI-2012 model // *Advances in Space Research*, 2017, vol.60, pp. 363–374. doi:10.1016/j.asr.2016.09.025.
- Kotov D. V., Richards P. G., Bogomaz O. V., Chernogor L. F., Truhlik V., Emelyanov L. Y., Chepurnyy Y. M., Domnin I. F. The importance of neutral hydrogen for the maintenance of the midlatitude winter nighttime ionosphere: Evidence from IS observations at Kharkiv, Ukraine, and field line interhemispheric plasma model simulations // *Journal Geophysical Research: Space Physics*, 2016, vol. 121, pp. 7013 – 7025. doi:10.1002/2016JA022442.
- Kotov D. V., Richards P. G., Truhlik V., Bogomaz O. V., Shulha M. O., Maruyama N., Hairston M., Miyoshi Y., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Matsuoka A., Shinohara I., Hernández-Pajares M., Domnin I. F., Zhivolup T. G., Emelyanov L. Ya., Chepurnyy Ya. M. Coincident Observations by the Kharkiv IS Radar and Ionosonde, DMSP and Arase (ERG) Satellites, and FLIP Model Simulations: Implications for the NRLMSISE-00 Hydrogen Density, Plasmasphere, and Ionosphere // *Geophysical Research Letters*, 2018. vol. 45, pp. 8062 – 8071. doi: 10.1029/2018GL079206.
- Digital Ionogram DataBase. Available at: <http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php> (accessed: 25.10.2018).
- Schunk R., Nagy. A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. New York: University Press, 2009. 628 p.

Поступила (received) 29.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шульга Марина Олексіївна (Шульга Марина Алексеевна, Shulha Maryna Oleksiivna) – молодший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: marina.shulga23@gmail.com.

Котов Дмитро Володимирович (Котов Дмитрий Владимирович, Kotov Dmytro Volodymyrovych) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: dmitrykotoff@gmail.com.

Богомаз Олександр Вікторович (Богомаз Александр Викторович, Bogomaz Oleksandr Viktorovych) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com.